



TITLE:

Microscopic Characteristics of Partially Saturated Soil and their Link to Macroscopic Responses(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Kido, Ryunosuke

CITATION:

Kido, Ryunosuke. Microscopic Characteristics of Partially Saturated Soil and their Link to Macroscopic Responses. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21737>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	木戸 隆之祐
論文題目	Microscopic Characteristics of Partially Saturated Soil and their Link to Macroscopic Responses (不飽和土の微視的特性とそれらの巨視的応答へのリンク)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、不飽和土の微視的特性の解明のみならず、それらと巨視的応答との関係を解明することを目的に、X線マイクロCTを用いて水分保持特性試験と三軸圧縮試験を実施したものであり、8章から構成されている。</p> <p>第1章では、本論文の背景と目的について記述した。道路盛土、堤防などの土構造物の強度評価方法に関する問題点と解決すべき研究課題を整理し、不飽和土の微視構造変化の解明の重要性を述べた。このような背景を踏まえ、本論文の目的、章構成を記述している。</p> <p>第2章では、本論文と関連の深い文献を整理した。従来の土構造物の強度評価方法、不飽和土の保水特性および強度特性に関して述べた。さらに、X線CTを用いた地盤材料内部の可視化を行う、国内外の主要な研究グループの特徴を整理した。</p> <p>第3章では、X線CT装置やCT画像の原理を述べ、本研究の核となるCT画像解析アルゴリズムを記述した。不飽和土は土粒子相、間隙水相、間隙空気相で構成されているが、本論文では特に、間隙水の微視的特性を解明するため、三つの画像解析法を確立した。一つ目はMorphology解析で、三相をセグメンテーションした画像（以下、三値化画像）を基に、erosionとdilationという画像処理を適用することで間隙水相を個々の連続性をもつクラスターに分割し、その数と体積を定量化する。飽和度が変化する場合の間隙水の体積分布や、粒子接点に存在する液架橋の数を調べることが目的である。二つ目は曲率解析で、三値化画像から間隙水相と間隙空気相の接触面を抽出し、間隙水の曲率を評価するものである。不飽和土の強度特性に影響するサクシジョンのレベルを調べることが目的である。三つ目はボロノイ分割で、個々の間隙を抽出しその間隙体積と飽和度を定量化する解析である。せん断変形に伴う保水性の変化を調べることが目的である。その他、ひずみ場や粒子接点を定量化する画像解析法も確立し、各画像解析手法の妥当性の検証も行った。</p> <p>第4章では、ゆる詰め・密詰めの豊浦砂を用いた水分保持特性試験を実施し、吸排水履歴を受けたときの間隙水および間隙空気の形態変化をMorphology解析で調べ、異なる飽和度における水分保持状態について議論した。その結果、間隙流体は「一つに連続した大きな体積のクラスター」あるいは「不連続で各々独立した小さな体積のクラスター」という二種類の形態で存在することを明らかにした。このような間隙流体の形態に基づくと、水分保持状態は「間隙空気が連続で間隙水が不連続」、「間隙空気が不連続で間隙水が連続」、「間隙空気も間隙水も連続」という三つの状態に分類でき、飽和度の変化に伴い間隙流体が形態を変えることを明らかにした。これらの傾向に明確な密度依存性は見られなかったが、密度の影響は間隙水のクラスター数に顕著に見られた。これは、密なほど土粒子の接点の数が多く、液架橋が多く形成されるためである。</p> <p>第5章では、不飽和珪砂の三軸圧縮試験にX線マイクロCTを適用し、せん断帯発達過程における間隙水の微視的特性の変化を調べた結果を記述した。盛土表層付近を想定し、体積膨張が生じる低拘束圧を与え、せん断中にサクシジョンが一定の排気－排水条件と、サクシジョンが変化する排気－非排水条件で三軸圧縮試験を行った。CT撮影は、せん断帯が発生すると考えられる局所領域を高解像度で撮影し、その画像を用いて種々の画像分析を行った。せん断帯が発達する</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	木戸 隆之祐
<p>と間隙比は局所的に大きくなり、保水性が失われるため飽和度が低下した。せん断帯は局所的に生じるため、多くの間隙体積は大きくなりその間隙の飽和度は低下していたが、密で高い飽和度を示す間隙も存在することが明らかとなった。水分保持状態の変化に関しては、初期飽和度が高いとき間隙水は連続であるがせん断によって連続性が低下した一方、初期飽和度が低いとき間隙水は一貫して不連続な状態であった。また、液架橋の数はせん断中に刻々と変化し、特にひずみ軟化過程において液架橋の数は減少する傾向があった。これらの微視的特性は、排水条件と非排水条件で同様に見られた。一方、非排水条件でせん断すると、液架橋の数は排水条件のせん断に比べてより多く減少する傾向があり、間隙水の曲率も徐々に減少することを明らかにした。粒子間の液架橋の曲率と充填角度の関係から、間隙水の曲率減少が充填角度の上昇に対応し、液架橋が存在しない条件に近づくため、液架橋が減少しやすいといえる。つまり、排水条件は間隙水の曲率が一定で液架橋の減少は主に粒子接触点の減少に起因するが、非排水条件は間隙水の曲率が減少するため、粒子接触点の減少だけでなく間隙水の曲率減少も液架橋の数の減少を助長するため、非排水条件下のせん断によってより多くの液架橋が減少すると考えられる。</p> <p>第6章では、実際の土構造物に用いられる試料の強度評価を目的とし、堤防の修復に用いられている淀川堤防砂の不飽和土三軸圧縮試験を実施し、その巨視的応答について記述した。空気圧よりも小さな間隙水圧を同時に与える方法で二種類のレベルのサクシオンを与え、第5章と同様のせん断条件で三軸圧縮試験を行った。排水条件下のせん断ではサクシオンが一定のまま変形が進むのに対し、非排水条件下のせん断では、初期サクシオンによらずせん断初期に大きくサクシオンが減少し、ひずみ軟化過程においても徐々に減少する傾向が見られた。このような不飽和土のサクシオンの変化は、既往の三軸圧縮試験においても同様であり、傾向が一致することを確認した。</p> <p>第7章では、第5章と第6章で得られた不飽和土の微視的特性と巨視的応答を関係付けるとともに、砂質盛土を例にあげ分類した不飽和土の強度評価方法について示した。初期飽和度の高い不飽和珪砂と初期サクシオンが低い不飽和淀川砂の応力ひずみ関係、および初期飽和度の低い不飽和珪砂と初期サクシオンが高い不飽和淀川砂の応力ひずみ関係はひずみ硬化後に膨張を伴いひずみ軟化し、排水・非排水条件下でせん断した際のピーク応力、残留応力の大小関係はそれぞれ定性的に一致した。初期飽和度が高く間隙水が連続なとき、サクシオンは有効応力に寄与し、排水条件と非排水条件におけるサクシオンの差もほとんどないため、ほぼ等価な軸差応力を示す。一方、初期の間隙水が不連続なとき、液架橋に働くサクシオンは粒子間結合力として土のせん断剛性・せん断強度を効果的に高める。非排水条件においてせん断初期にサクシオンが大きく減少する上、間隙水の曲率減少によって液架橋の数が大きく減少するため、非排水条件のピーク軸差応力が低くなると考えられる。残留応力は、初期の水分保持状態によらず、非排水条件の方が排水条件よりも低くなった。これは、非排水条件において液架橋の数がより大きく減少し、かつ間隙水の曲率も減少するため、液架橋に働くサクシオンによるせん断剛性・せん断強度を高める効果が排水条件よりも小さくなるためと考えられる。強度評価方法に関しては、盛土表層は間隙水が連続な状態と考えられるため、排水・非排水条件の両方が適用可能である。盛土深部は表層に比べ飽和度が低く間隙水が不連続になる場合があるため、透水性の良さやせん断速度を考慮した上で適切な排水条件を選択することが重要である。</p> <p>第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の課題について整理した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、不飽和土の微視的特性の解明と、それらが巨視的応答へ及ぼす影響の解明を実施したものである。不飽和砂の水分保持特性試験と三軸圧縮試験に対し X 線 CT および画像解析を適用し、特に間隙水の微視的挙動に関する分析を行った。

水分保持特性試験では、異なる飽和度下における水分保持状態について議論した。三軸圧縮試験では、盛土表層付近を想定し、体積膨張が生じる低拘束圧を与え、せん断中にサクシオンが一定の排気－排水条件、サクシオンが変化する排気－非排水条件下における不飽和砂の応力ひずみ関係を調べた。さらにせん断帯における間隙水の曲率、液架橋の数などの微視的特性を詳細に調べ、検討した。

本研究において得られた主な結論を以下に示す。

1. 不飽和砂内部の間隙水と間隙空気は、連続化した大きな体積で間隙を占める形態か、不連続化し小さな体積で空間的に分布する形態で存在する。このような連続性に基づく、異なる飽和度下における不飽和砂の水分保持状態は、大きく 3 つに分類することができる。
2. 不飽和砂の三軸圧縮試験で得られる残留応力は、初期飽和度によらず、排気－排水条件よりも排気－非排水条件の方が低くなる。これは、せん断に伴い間隙水の曲率すなわちサクシオンが減少し、粒子間の液架橋が排気－排水条件よりも多く減少するという、非排水条件特有の不飽和砂の微視的特性に起因する。
3. 初期飽和度が高く間隙水が連続で液架橋が少ない場合、サクシオンは土粒子接触点における結合でなく等方的な平均有効応力により寄与するため、排水条件が異なっても不飽和砂のピーク応力は同等となる。初期飽和度が低く液架橋が多く分布する場合、サクシオンは土粒子接触点における結合を強めてせん断に対する強度・剛性を高めるため、一定曲率の液架橋がより多く分布する排水条件は、非排水条件に比べ高いピーク応力を示す。
4. 不飽和砂内部の液架橋や間隙水の曲率といった微視的特性は、三軸圧縮下でのピーク応力や残留応力といった巨視的応答へ寄与し、その影響度は初期の水分保持状態およびせん断時の排水条件によって異なる。初期飽和度が低く液架橋が不飽和土内に多く分布する場合、排水条件によって初期剛性と強度が大きく異なるため、間隙水圧発生の有無を考慮し、適切な排水条件で不飽和土の強度評価を行うことが重要である。

以上、本論文は、不飽和土の微視的特性の解明と、それらが巨視的応答へ及ぼす影響の解明を実施したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 31 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

